

含沥青乳液和无机添加剂的冷再生沥青混合料性能评价

黄彦春

新疆交通建设集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年3月4日; 录用日期: 2025年3月23日; 发布日期: 2025年4月7日

摘要

本研究着重对含沥青乳液与无机添加剂的冷再生沥青混合料性能展开评价。借助全面且系统的实验, 深入剖析了不同原材料特性对混合料性能的影响, 以及混合料在力学性能、路用性能等多个维度的表现。研究结果清晰表明, 合理选用沥青乳液与无机添加剂, 并优化其配合比, 能够显著提升冷再生沥青混合料的性能, 为该技术 in 道路工程领域的广泛应用提供坚实有力的支撑。本研究成果为道路工程的可持续发展提供了关键的技术参考与理论依据。

关键词

冷再生沥青混合料, 沥青乳液, 无机添加剂, 力学性能, 路用性能

Evaluation of Properties of Cold Reclaimed Asphalt Mixtures Containing Asphalt Emulsions and Inorganic Additives

Yanchun Huang

Xinjiang Communications Construction Group Co., LTD, Urumqi Xinjiang

Received: Mar. 4th, 2025; accepted: Mar. 23rd, 2025; published: Apr. 7th, 2025

Abstract

This study focuses on the evaluation of the performance of cold reclaimed asphalt mixture containing asphalt emulsion and inorganic additives. With the help of comprehensive and systematic experiments, the influences of different raw material properties on the performance of the mixture, as well as the performance of the mixture in multiple dimensions such as mechanical properties and road

performance are deeply analyzed. The research results clearly show that reasonable selection of asphalt emulsion and inorganic additives and optimization of their mix ratio can significantly improve the performance of cold reclaimed asphalt mixture, and provide a solid support for the wide application of this technology in the field of road engineering. The research results provide key technical reference and theoretical basis for the sustainable development of road engineering.

Keywords

Cold Recycled Asphalt Mixture, Asphalt Emulsion, Inorganic Additives, Mechanical Properties, Road Performance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当今时代，随着城市化进程的加速推进以及交通量的持续攀升，道路建设规模不断扩大。与此同时，全社会对环境保护的重视程度日益加深，对道路材料的可持续性与性能提出了更为严苛的要求。传统的热拌沥青混合料在道路建设中曾占据主导地位[1]-[4]，但其生产过程存在诸多弊端。一方面，热拌沥青混合料需要将骨料和沥青加热至较高温度，这一操作不仅消耗大量能源，据相关统计，每生产 1 吨热拌沥青混合料，能耗约为 15~20 千克标准煤；另一方面，高温加热过程会导致大量污染物排放，如二氧化硫、氮氧化物以及粉尘等，对环境造成严重污染。

冷再生沥青混合料技术作为一种极具潜力的绿色道路材料技术[5]-[10]，应运而生并逐渐受到广泛关注。该技术充分利用旧沥青路面铣刨后的材料，通过添加沥青乳液和无机添加剂等，经过拌和、摊铺和压实等一系列工序，最终形成新的路面结构层。其中，沥青乳液在常温下具有良好的流动性，能够在较低温度条件下迅速且均匀地包裹骨料，从而有效降低能源消耗；无机添加剂则通过复杂的化学反应，改善混合料的物理力学性能，提升路面质量。因此，深入研究含沥青乳液和无机添加剂的冷再生沥青混合料性能，对于推动道路工程的绿色可持续发展、降低建设成本、延长道路使用寿命具有极为重要的现实意义。

国内外众多学者围绕冷再生沥青混合料开展了广泛且深入的研究。在沥青乳液方面[11]-[13]，研究主要聚焦于不同类型沥青乳液的破乳特性、与骨料的粘附性能以及对混合料初期强度形成的影响机制。例如，阳离子快裂型沥青乳液破乳速度较快，能够在短时间内形成初期强度，但可能会对后期强度增长产生一定限制；而阳离子慢裂型沥青乳液破乳速度相对较慢，有利于在较长时间内保持混合料的工作性能，对后期强度发展较为有利。

在无机添加剂的研究领域[14]-[16]，主要关注其种类、掺量对混合料强度增长以及耐久性提升的作用机制。以普通硅酸盐水泥为例，其在水化过程中，水泥中的硅酸三钙 C_3S 和硅酸二钙 C_2S 等矿物成分会与水发生反应，生成大量的水化硅酸钙 C-S-H 凝胶和氢氧化钙 $Ca(OH)_2$ 晶体，这些产物填充在骨料之间的空隙中，增强了混合料的骨架结构和粘结性能，从而显著提高强度和耐久性。

然而，当前研究在沥青乳液与无机添加剂的协同作用对冷再生沥青混合料性能的综合影响方面，仍存在明显不足。虽然已经对沥青乳液和无机添加剂各自的作用进行了大量研究，但对于两者在混合料中如何相互作用、协同影响性能的研究还不够系统和深入。此外，对于不同原材料特性与混合料性能之间的定量关系研究也有待进一步加强，现有的研究成果大多停留在定性描述阶段，缺乏精确的数学模型和

量化分析，这在一定程度上限制了冷再生沥青混合料技术的精准应用和优化设计。

2. 实验方法及材料

2.1. 原材料

2.1.1. 沥青乳液

选用阳离子慢裂型沥青乳液，其技术指标如下：沥青含量为 50%，筛上剩余量(1.18 mm 筛)不超过 0.1%，恩格拉粘度(E25)为 5~10，蒸发残留物含量不低于 48%，残留物针入度(25°C, 100 g, 5 s)为 60~100 (0.1 mm)，残留物延度(15°C)不小于 40 cm。

2.1.2. 无机添加剂

采用普通硅酸盐水泥作为无机添加剂，其强度等级为 42.5，初凝时间不早于 45 min，终凝时间不迟于 10 h，安定性合格，3 d 抗压强度不低于 17 MPa，28 d 抗压强度不低于 42.5 MPa。

2.1.3. 骨料

再生骨料取自新疆地区某旧沥青路面铣刨料，经过筛分处理后，其级配满足规范要求。新骨料选用石灰岩碎石，其压碎值不大于 26%，洛杉矶磨耗损失不大于 30%，表观相对密度不小于 2.60，坚固性不大于 12%，针片状含量不大于 15%。

2.2. 实验设备

使用强制间歇式搅拌机进行混合料拌和；采用万能材料试验机测试混合料的抗压强度、劈裂强度和抗剪强度；利用车辙试验机评价混合料的高温稳定性；通过低温弯曲试验机测试混合料的低温抗裂性；借助浸水马歇尔试验仪和冻融劈裂试验仪评估混合料的水稳定性。

2.3. 实验方案

2.3.1. 配合比设计

采用马歇尔设计方法，以再生骨料与新骨料的比例为 6:4，固定水泥掺量分别为 3%、4%、5%，沥青乳液用量在 4%~6%范围内变化，设计不同配合比的冷再生沥青混合料，具体配合比如表 1 所示。

Table 1. Design of mix proportion (Recycled aggregate:New aggregate = 3:2)

表 1. 配合比设计(再生骨料:新骨料 = 3:2)

编号	水泥掺量(%)	沥青乳液用量(%)	编号	水泥掺量(%)	沥青乳液用量(%)
1	3	4	9	4	5.5
2	3	4.5	10	4	6
3	3	5	11	5	4
4	3	5.5	12	5	4.5
5	3	6	13	5	5
6	4	4	14	5	5.5
7	4	4.5	15	5	6
8	4	5			

2.3.2. 性能测试

对不同配合比的冷再生沥青混合料进行全面的力学性能测试。在测试抗压强度时，将混合料按照标

准方法制成边长为 150 mm 的立方体试件。试件成型后, 放置在标准养护条件下(温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 95%以上)养护至规定龄期(7 d、14 d、28 d)。然后在万能材料试验机上, 以 0.5 MPa/s 的加载速率进行加载直至破坏, 记录破坏荷载, 并根据公式计算抗压强度。

劈裂强度测试采用直径为 100 mm、高为 100 mm 的圆柱体试件。同样在标准养护条件下养护至规定龄期后, 在万能材料试验机上, 以 0.05 MPa/s 的加载速率进行加载, 通过劈裂破坏荷载计算劈裂强度。

抗剪强度测试采用直剪试验方法, 试件尺寸为边长 150 mm 的立方体。在标准养护至 28 d 后, 在万能材料试验机上, 按照规定的加载速率进行加载, 测定抗剪强度。

同时, 进行路用性能测试。高温稳定性测试时, 将混合料按照标准方法制成尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的车辙板试件。试件在 60°C 的车辙试验机中, 以 0.7 MPa 的轮压和 42 次/min 的行走速度进行车辙试验, 记录试件在一定时间内的变形情况, 通过公式计算出车辙动稳定度, 以此评价混合料的高温稳定性。

低温抗裂性测试时, 将混合料制成尺寸为 $250\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ 的小梁试件。在 -10°C 的低温弯曲试验机中, 以 50 mm/min 的加载速率进行弯曲试验, 测量小梁试件破坏时的弯曲应变, 以此评价混合料的低温抗裂性。

水稳定性测试包括浸水马歇尔残留稳定度测试和冻融劈裂强度比测试。浸水马歇尔残留稳定度测试时, 先将马歇尔试件在常温下浸水 48 h, 然后在规定的加载速率下测定其残留稳定度; 冻融劈裂强度比测试时, 将圆柱体试件进行冻融循环处理(-18°C 冷冻 16 h, 60°C 水浴 24 h 为一个循环), 经过规定次数的冻融循环后, 测定其劈裂强度, 并与未经过冻融循环的试件劈裂强度相比, 计算冻融劈裂强度比, 以此评价混合料的水稳定性。

3. 结果及分析

3.1. 力学性能

3.1.1. 抗压强度

随着水泥掺量的增加, 冷再生沥青混合料的抗压强度呈现出显著的上升趋势。从微观层面剖析, 水泥中的主要矿物成分, 如硅酸三钙 C_3S 和硅酸二钙 C_2S , 在与水接触后迅速发生水化反应。 C_3S 水化生成水化硅酸钙 C-S-H 凝胶和氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C_2S 的水化反应相对较慢, 但同样生成 C-S-H 凝胶, 这些产物相互交织, 逐步构建起稳固的刚性骨架结构, 极大地增强了混合料的整体承载能力。

Table 2. Compressive strength of cold reclaimed asphalt mixture under different working conditions
表 2. 不同工况条件下冷再生沥青混合料抗压强度

编号	水泥掺量 (%)	沥青乳液用量 (%)	7 d 抗压强度 (MPa)	28 d 抗压强度 (MPa)	编号	水泥掺量 (%)	沥青乳液用量 (%)	7 d 抗压强度 (MPa)	28 d 抗压强度 (MPa)
1	3	4	2.0	3.0	9	4	5.5	2.7	3.9
2	3	4.5	2.2	3.2	10	4	6	2.5	3.7
3	3	5	2.4	3.4	11	5	4	2.6	4.2
4	3	5.5	2.3	3.3	12	5	4.5	2.9	4.5
5	3	6	2.1	3.1	13	5	5	3.5	5.8
6	4	4	2.3	3.6	14	5	5.5	3.3	5.5
7	4	4.5	2.6	3.8	15	5	6	3.1	5.2
8	4	5	2.8	4.0					

在相同水泥掺量条件下, 沥青乳液用量的变化对混合料抗压强度的影响呈现出先增后减的规律。当沥青乳液用量处于较低水平时, 随着用量的增加, 其良好的流动性使其能够充分包裹骨料, 填充骨料间的微小空隙, 有效提高了混合料的密实度, 进而增强了抗压强度。然而, 当沥青乳液用量超过一定阈值后, 过多的沥青乳液会在骨料表面形成较厚的润滑膜, 削弱了水泥水化产物之间以及水泥与骨料之间的粘结力, 导致抗压强度下降。

以 7 d 龄期为例, 水泥掺量为 3% 时, 沥青乳液用量从 4% 增加到 5%, 抗压强度从 2.0 MPa 提升至 2.4 MPa; 而当沥青乳液用量进一步增加到 6% 时, 抗压强度降至 2.1 MPa。28 d 龄期时, 水泥掺量为 5%、沥青乳液用量为 5% 的混合料抗压强度达到 5.8 MPa, 这一数据充分验证了上述规律。详细数据见表 2。

3.1.2. 劈裂强度

劈裂强度的变化趋势与抗压强度具有相似性。水泥掺量的增加, 通过其水化反应生成的大量胶凝产物, 不仅增强了骨料之间的粘结强度, 还使混合料内部结构更加紧密, 从而显著提高了劈裂强度。同时, 沥青乳液在其中发挥着不可或缺的作用。适量的沥青乳液能够在骨料表面形成连续的粘结膜, 增强了骨料与沥青之间的粘附力, 使得混合料在承受拉应力时, 能够更好地协同工作, 减少内部裂缝的产生和扩展, 进而提高劈裂强度。

在 14 d 龄期时, 水泥掺量为 4%、沥青乳液用量为 5.5% 的混合料劈裂强度达到 0.6 MPa; 到 28 d 龄期时, 劈裂强度增长至 0.8 MPa。对比不同水泥掺量和沥青乳液用量下的劈裂强度数据可以发现, 当水泥掺量从 3% 提高到 4%, 且沥青乳液用量保持在 5%~5.5% 范围时, 劈裂强度有较为明显的提升。这进一步表明了水泥和沥青乳液在提高混合料抵抗拉应力方面的协同作用。具体数据见表 3。

Table 3. Splitting strength of cold reclaimed asphalt mixture under different working conditions

表 3. 不同工况条件下冷再生沥青混合料劈裂强度

编号	水泥掺量(%)	沥青乳液用量(%)	14 d 劈裂强度 (MPa)	28 d 劈裂强度 (MPa)	编号	水泥掺量(%)	沥青乳液用量(%)	14 d 劈裂强度 (MPa)	28 d 劈裂强度 (MPa)
1	3	4	0.4	0.5	9	4	5.5	0.6	0.8
2	3	4.5	0.42	0.52	10	4	6	0.58	0.78
3	3	5	0.45	0.55	11	5	4	0.52	0.72
4	3	5.5	0.44	0.54	12	5	4.5	0.58	0.8
5	3	6	0.41	0.51	13	5	5	0.6	0.85
6	4	4	0.48	0.6	14	5	5.5	0.59	0.83
7	4	4.5	0.52	0.65	15	5	6	0.56	0.8
8	4	5	0.55	0.7					

3.1.3. 抗剪强度

抗剪强度随着水泥掺量的增加而显著增大。水泥水化产物填充了骨料间的空隙, 使得骨料排列更加紧密, 增大了颗粒间的摩擦力。同时, 这些水化产物与骨料表面发生化学反应, 形成化学键合, 进一步增强了颗粒间的粘结力。沥青乳液在抗剪性能提升方面也发挥着重要作用。其在骨料表面形成的粘结膜, 不仅提高了骨料之间的粘附性, 还在一定程度上起到了应力传递和分散的作用, 使得混合料在受到剪切力时, 能够更有效地抵抗破坏。

当水泥掺量为 4%、沥青乳液用量为 5% 时, 混合料在 28 d 龄期的抗剪强度达到 1.2 MPa。与其他配合比相比, 这一配合比下的抗剪强度相对较高, 表明在该配比下, 水泥的胶凝作用和沥青乳液的粘结作

用达到了较好的协同效果。通过对不同配合比抗剪强度数据的分析可以发现,水泥掺量从 3%增加到 4%时,抗剪强度有较为明显的提升;而沥青乳液用量在 4%~5%范围内变化时,对抗剪强度的影响较为显著。详细数据见表 4。

Table 4. Shear strength of cold reclaimed asphalt mixture under different working conditions
表 4. 不同工况条件下冷再生沥青混合料抗剪强度

编号	水泥掺量 (%)	沥青乳液用量 (%)	28 d 抗剪强度 (MPa)	编号	水泥掺量 (%)	沥青乳液用量 (%)	28 d 抗剪强度 (MPa)
1	3	4	0.8	9	4	5.5	1.15
2	3	4.5	0.85	10	4	6	1.1
3	3	5	0.9	11	5	4	1.0
4	3	5.5	0.88	12	5	4.5	1.1
5	3	6	0.82	13	5	5	1.2
6	4	4	0.95	14	5	5.5	1.18
7	4	4.5	1.05	15	5	6	1.15
8	4	5	1.2				

3.2. 路用性能

3.2.1. 高温稳定性

车辙动稳定度测试结果清晰地表明,随着水泥掺量的增加,冷再生沥青混合料的高温稳定性得到显著提高。在高温环境下,水泥水化产物形成的刚性骨架结构能够有效限制骨料的相对位移,抵抗因车辆荷载反复作用而产生的变形。当水泥掺量从 3%增加到 5%时,60℃车辙动稳定度从 1500 次/mm 大幅提高到 3000 次/mm 以上。

沥青乳液用量对高温稳定性的影响较为复杂。适量的沥青乳液能够使混合料具有更好的整体性,增强骨料之间的粘结力,从而在一定程度上提高高温稳定性。然而,当沥青乳液用量过多时,在高温下沥青乳液容易变软,其粘度降低,无法有效地约束骨料的运动,导致高温稳定性下降。例如,在水泥掺量为 3%时,沥青乳液用量从 4%增加到 5%,车辙动稳定度从 1500 次/mm 提高到 1700 次/mm;但当沥青乳液用量进一步增加到 6%时,车辙动稳定度降至 1550 次/mm。具体数据见表 5。

Table 5. Rutting stability of cold recycled asphalt mixture under different working conditions
表 5. 不同工况条件下冷再生沥青混合料车辙动稳定度

编号	水泥掺量 (%)	沥青乳液用量 (%)	60℃车辙动稳定度 (次/mm)	编号	水泥掺量 (%)	沥青乳液用量 (%)	60℃车辙动稳定度 (次/mm)
1	3	4	1500	9	4	5.5	2400
2	3	4.5	1600	10	4	6	2300
3	3	5	1700	11	5	4	2800
4	3	5.5	1650	12	5	4.5	3000
5	3	6	1550	13	5	5	3200
6	4	4	2000	14	5	5.5	3100
7	4	4.5	2200	15	5	6	3050
8	4	5	2500				

3.2.2. 低温抗裂性

低温弯曲破坏应变测试结果显示, 沥青乳液用量的增加对低温抗裂性具有显著的改善作用。在低温环境下, 沥青乳液中的沥青质和胶质等成分能够保持一定的柔韧性, 当混合料受到低温收缩应力时, 沥青乳液能够通过自身的变形来吸收和分散应力, 有效减少裂缝的产生和发展。当沥青乳液用量从 4% 增加到 6% 时, -10°C 小梁弯曲破坏应变从 $2000\ \mu\epsilon$ 提高到 $3000\ \mu\epsilon$ 以上。

然而, 水泥掺量过高会对低温抗裂性产生不利影响。水泥水化产物在低温下呈现出较高的脆性, 过多的水泥会使混合料整体的柔韧性下降, 导致在低温环境下容易产生裂缝。例如, 在沥青乳液用量为 5% 时, 水泥掺量从 3% 增加到 5%, -10°C 小梁弯曲破坏应变从 $2400\ \mu\epsilon$ 降低到 $2200\ \mu\epsilon$ 。详细数据见表 6。

Table 6. Bending failure strain of cold reclaimed asphalt mixture under different working conditions

表 6. 不同工况条件下冷再生沥青混合料弯曲破坏应变

编号	水泥掺量 (%)	沥青乳液用量 (%)	-10°C 小梁弯曲破坏应变($\mu\epsilon$)	编号	水泥掺量 (%)	沥青乳液用量 (%)	-10°C 小梁弯曲破坏应变($\mu\epsilon$)
1	3	4	2000	9	4	5.5	2500
2	3	4.5	2200	10	4	6	2700
3	3	5	2400	11	5	4	1800
4	3	5.5	2600	12	5	4.5	2000
5	3	6	2800	13	5	5	2200
6	4	4	1900	14	5	5.5	2400
7	4	4.5	2100	15	5	6	2600
8	4	5	2300				

3.2.3. 水稳定性

浸水马歇尔残留稳定性和冻融劈裂强度比测试结果表明, 水泥掺量和沥青乳液用量的合理增加均能有效提高冷再生沥青混合料的水稳定性。水泥的水化产物填充了混合料的空隙, 减少了水分的侵入路径, 同时, 水泥与骨料之间的化学反应增强了骨料表面的活性, 提高了骨料与沥青之间的粘附力。沥青乳液在骨料表面形成的保护膜, 进一步阻止了水分的侵入, 并且其粘结作用使得骨料与沥青之间的粘结更加牢固。

Table 7. Stability index of cold reclaimed asphalt mixture under different working conditions

表 7. 不同工况条件下冷再生沥青混合料水稳定性指标

编号	水泥掺量 (%)	沥青乳液用量 (%)	浸水马歇尔残留稳定度 (%)	冻融劈裂强度比 (%)	编号	水泥掺量 (%)	沥青乳液用量 (%)	浸水马歇尔残留稳定度 (%)	冻融劈裂强度比 (%)
1	3	4	75	70	9	4	5.5	85	81
2	3	4.5	78	72	10	4	6	84	80
3	3	5	80	75	11	5	4	84	80
4	3	5.5	79	74	12	5	4.5	85	82
5	3	6	77	73	13	5	5	88	85
6	4	4	82	78	14	5	5.5	87	84
7	4	4.5	83	80	15	5	6	86	83
8	4	5	86	82					

当水泥掺量为 4%、沥青乳液用量为 5%时,浸水马歇尔残留稳定度达到 85%以上,冻融劈裂强度比达到 80%以上。对比不同配合比的水稳定性数据可以发现,在水泥掺量从 3%增加到 4%的过程中,浸水马歇尔残留稳定度和冻融劈裂强度比均有较为明显的提升;而沥青乳液用量在 4.5%~5%范围内时,对水稳定性的改善效果最佳。具体数据见表 7。

4. 结语

本研究通过对含沥青乳液和无机添加剂的冷再生沥青混合料的全面实验和分析,得出以下结论:

(1) 沥青乳液和无机添加剂对冷再生沥青混合料性能有显著影响。合理选择沥青乳液类型和用量、无机添加剂种类和掺量,能有效提升混合料的力学性能和路用性能。

(2) 在力学性能方面,水泥掺量的增加显著提高抗压强度、劈裂强度和抗剪强度,沥青乳液用量在一定范围内也有积极作用。

(3) 在路用性能方面,水泥掺量增加可显著提高高温稳定性,沥青乳液用量增加可显著改善低温抗裂性,两者合理增加均可提高水稳定性。

(4) 综合考虑各项性能,推荐水泥掺量为 4%~5%,沥青乳液用量为 5%~5.5%的配合比用于实际工程。

参考文献

- [1] 董夫强, 祖元哲, 朱启洋, 柳林, 王海军. 热拌沥青混合料拌和和易性的评价方法[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(3): 275-282.
- [2] 李包, 李宁, 陈晨, 刘雨鑫. 泡沫沥青对热拌沥青混合料路用性能的影响[J]. 中外公路, 2022, 42(5): 178-183.
- [3] 晏群. 高速公路热拌沥青混合料施工技术[J]. 运输经理世界, 2024(30): 47-49.
- [4] 韦剑双. 用于路面修复的热拌沥青混合料性能评估[J]. 西部交通科技, 2024(11): 59-61.
- [5] 刘韬, 易明, 宋涛. 生石灰对冷拌沥青混合料性能的影响研究[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 231-234.
- [6] 曹安贞, 徐海峰, 樊亮, 张岩, 林江涛. 冷拌沥青混合料技术现状评述[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(5): 118-122.
- [7] 张岩, 周圣杰, 樊亮. 基于地聚反应的冷拌沥青混合料强度特性与机理探讨[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 340-349.
- [8] 孙建宇. 冷拌沥青混合料路用性能研究[J]. 交通世界, 2022(18): 68-70.
- [9] 徐文, 文正, 张恺, 蔡宏庆, 韩涵, 汪铭康. 配合比设计参数对冷拌沥青混合料性能影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(2): 342-346.
- [10] 刘建芳, 李九苏, 杨帆, 石扬, 王争愿. 反应型冷拌沥青混合料制备及性能研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 16-21.
- [11] 朱鸿斌, 王富, 宋金苑, 钱俊懿. 冷拌超薄沥青混合料乳化剂剂量研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(3): 111-113.
- [12] 孙海明, 马世东, 张乾, 刘凡恺, 赵品晖. 乳化沥青干燥过程的影响因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(2): 180-188.
- [13] 朱祖煌, 潘昌鸾, 陈龙, 梁德强, 磨炼同. 复合改性乳化沥青冷再生混合料性能评价[J]. 建材世界, 2019, 40(4): 19-23.
- [14] 陈凤君, 韩亮. 添加剂对沥青混合料拌和的影响与应用[J]. 汽车画刊, 2025(1): 110-112.
- [15] 张瑜, 吴义春, 张小元, 赵杨华, 刘帅. 添加剂对凝灰岩沥青混合料粘附性能影响[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(2): 62-65, 69.
- [16] 屈凡锋, 冯雪, 冯化新. 沥青添加剂特性及其混合料性能研究[J]. 房地产导刊, 2022(14): 151-152, 155.